

# 封じ込め磁界を利用したトロイダルプラズマ式 マグネトロンスパッタ法の開発

高橋 隆一\*, 米田 政明\*\*, 直江 正彦\*\*\*

## 1. ま え が き

近年、省資源、無公害化などの時代の要請や超高精度材料加工技術の要求など、新しい社会的ニーズに対応した薄膜形成技術が注目され始めている。薄膜は半導体デバイスを始め、各種のエレクトロニクス材料として現在の電子工学の分野で広く用いられている。その結果、薄膜形成技術は各種デバイス作製の一手段として現在の電子工業界に欠かせない重要な役割を担っている上、未知の研究分野も数多く残されており、この研究は1990年代の材料あるいはデバイスの開発に不可欠とされている。中でも、スパッタ現象<sup>1)</sup>を利用した薄膜形成技術は他の方法よりも優れており、その応用はますますその範囲を広げ、あらゆる薄膜形成に使用されている。

従来、スパッタ法の最大の欠点であった低膜形成速度<sup>2)</sup>、膜形成中の基板温度の著しい上昇<sup>3)</sup>、高ガス圧中での膜形成、などの問題がマグネトロンスパッタ法の開発<sup>4)</sup>によってある程度解決された。その結果、スパッタ法の優秀性が広く認識されるようになって多くの工業分野にまで応用されるようになった。しかし、薄膜の高速・低温形成に最適なマグネトロンスパッタ法では、 $\gamma$ 電子の封じ込めが完全でない(図1参照)<sup>5)</sup>、ターゲットの利用率が極端に悪い<sup>6)</sup>、低雰囲気ガス圧中での放電が不安定である<sup>7)</sup>、強磁性体膜の高速・低温形成が難しい<sup>7)</sup>、などの欠点がある。このようにマグネトロンスパッタ法においても種々の問題が生じ、新しい方法の提案・開発が将来の良質な膜の高速・低温形成を達成する唯一の方法であると考えられる。そこで、我々は通常の円板ターゲットの中心に穴をあけた平板(プレーナ)リングターゲットを用いるトロイダルプラズマ式(Toroidal Plasma: TP)マグネトロンスパッタ法を提案した<sup>8)</sup>。実際に試作装置でFe, Niなどのプレーナリングターゲットを用いて放電実験を行った結果、 $\gamma$ 電子の封じ込めがより強力になることが示され<sup>9)</sup>、TPマグネトロンスパッタ法が強磁性体膜の高速スパッタ法として優れた特性を有していることが明らかにされた。

実際に膜形成の応用として、垂直磁気記録媒体用Co-Cr膜、垂直ヘッド用軟磁性Co-Zrアモルファス膜などを取り上げた。以下、順を追って、実験結果について説明する。

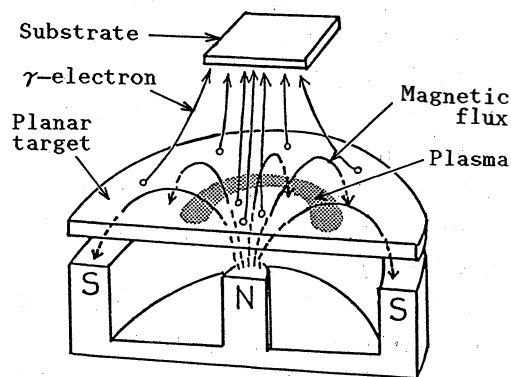


図1 通常のマグネトロンスパッタ法における $\gamma$ 電子の基板衝撃

\*富山大学工学部電気工学科

\*\*富山大学工学部電子工学科

\*\*\*東京工業大学工学部電子物理工学科

## 2. TPマグネトロンスパッタ法の開発

マグネトロンスパッタ法で強磁性体ターゲットを用いて膜形成を行うと、 $\gamma$ 電子封じ込め用の漏洩磁界がターゲット面上にほとんど現われないために原理上、高速スパッタが出来ない。一般に、磁界を用いたプラグマの封じ込め方法には通常のマグネトロンスパッタ法<sup>4)</sup>、対向ターゲット式スパッタ法<sup>10)</sup>、ここで提案したTPマグネトロンスパッタ法(図2参照)などがある。この中で最も安定にプラズマ封じ込めが可能な方法はTPマグネトロンスパッタ法である。強磁性体プレーナリングターゲットの使用により、磁極がターゲット面よりも高くなり、ターゲット面上の漏洩磁界が著しく増大するために $\gamma$ 電子の封じ込めが完全になる。その結果、 $\gamma$ 電子による基板衝撃が全くない、いわゆるプラズマフリーの状態での膜形成が可能となる。さらにターゲット利用率の向上も期待できる。

開発に先立ち、最適モデルを有限要素法を用いた磁界解析により決定した。TPマグネトロンスパッタ電極を試作し、その磁束密度分布をガウスメータで測定した。本装置では、 $\gamma$ 電子の封じ込めをより容易に、かつガス分子のイオン化を促進するために外部ソレノイドコイルによる磁界( $B_s$ )を基板側からターゲット面に向かって印加した<sup>11)</sup>。ターゲット近傍の面内磁束密度( $B_{//}$ )の実測値はプレーナリングターゲットの内縁および外縁付近で極端に強く、ターゲットの中間部分では弱いことが分った。この結果は有限要素法による計算値とほぼ同じ傾向を示している<sup>12)</sup>。しかし、通常の強磁性体ディスクターゲットの場合の測定結果よりは、はるかに漏洩磁界は強く<sup>8)</sup>、磁極をターゲット面よりも高くした効果は十分に現れている。この磁界の強さはプレーナリングターゲット上にトロイダルプラズマの形成を可能にするもので、プラズマフリーの条件下での膜形成が期待できる。

そこで、装置の放電特性を調べた。 $B_s$ の印加により、良好な低電圧特性が得られ、放電電流( $I_d$ )を250mAまで増加させたときの印加電圧( $V_a$ )の上昇幅は60V程度であり、 $B_s$ が大きい方が上昇幅は小さい。放電可能なArガス圧の下限は0.2Paで、かつ470Vと低電圧特性を示し、安定なマグネatron放電が観測された。さらに $B_s$ の印加により、トロイダルプラズマの半径が減少することも明らかになった<sup>13)</sup>。プレーナリングターゲットの材質をNiに変えた場合もFeの場合と同じ傾向を示した。ターゲットの侵食は図3のようにプレーナリングの内縁に近づくにつれて激しくなってくる<sup>14)</sup>。これは、ターゲット面上の $B_{//}$ の値と関係しており、強いほど侵食が激しいことが分った。また、プレーナリングターゲットの材質により侵食領域が変化することも示された<sup>15)</sup>。

Feプレーナリングターゲットの場合の膜形成速度( $R_d$ )は0.63W/cm<sup>2</sup>の投入電力密度で1.3 $\mu$ m/hr程度であり、かなり速度な値である。投入電力を増やせば、より速い値が得られる。また、Niプレーナリングターゲットを用いたときは $R_d$ は最大となり、1.7 $\mu$ m/hr程度であった。Feのような強磁性体プレーナリングターゲットを用いた場合でも、低ガス圧領域まで安定

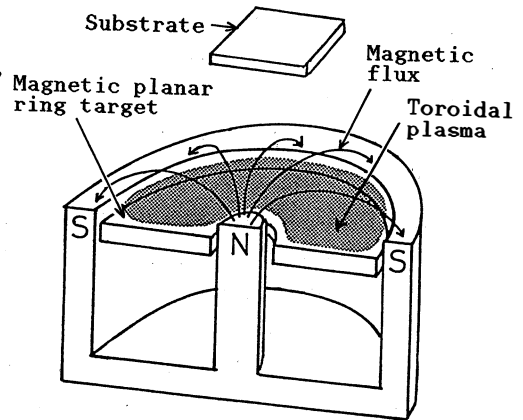


図2 トロイダルプラズマ式(TP)マグネトロンスパッタ法におけるプラズマの様子

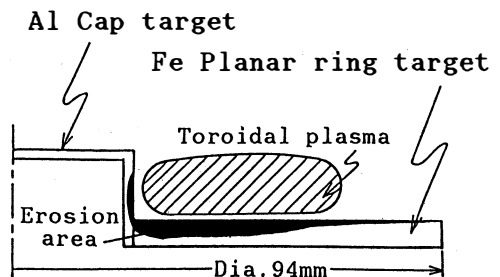


図3 プレーナリングターゲットの侵食パターン

な放電が持続し、ターゲット面上にトロイダルプラズマの形成が可能になり、プラズマフリーの状態  
で磁性体膜形成ができることが分った。

### 3. Co-Cr 膜の形成

TP マグネトロンスパッタ法の磁性薄膜形成の応用として近年高密度磁気記録が可能な垂直磁気記録方式<sup>16)</sup>に注目し、その記録媒体である Co-Cr 膜<sup>17)</sup>を取り上げた。Co-Cr は大きな異方性磁界と飽和磁化を持ち、垂直磁気記録媒体として有望であると考えられている。このような大きな異方性磁界を有する物質の多くは六方晶の結晶構造を持ち、ほとんどが c 軸を磁化容易軸とする磁性材料である。垂直磁気記録方式は磁性層の厚さ方向に信号を記録しようとするものであり、超高密度記録になるにつれて媒体内に作用する減磁界が原理的に零に近づくため、各方面から注目されている。

そこで、図 4 の TP マグネトロンスパッタ装置を用いて Co-Cr 膜の形成を試みた。本実験では、Co プレーナリング、Cr シリンダー、Co ディスクの 3 種類のターゲットを用いる複合ターゲット形スパッタ法を採用した。ターゲットの面積比を Co:Cr=9:1 とした。一般に、Co-Cr スパッタ膜の形成では装置の初期到達真空度が形成膜の膜質に影響を与えることが分っている<sup>19)</sup>。そこで装置のベルジャーをステンレスにしたため、初期到達真空度は  $2 \times 10^{-4}$  Pa まで向上した<sup>20)</sup>。

まず、装置の直流放電特性について調べた。図 5 に装置の放電電流 ( $I_d$ )—印加電圧 ( $V_a$ ) 特性を示す。 $V_a$  は Ar ガス圧 ( $P_{Ar}$ ) が低くなるにつれて高くなるが、0.2 Pa とかなり低いガス圧でも  $V_a$  は 520 V と低い値を示している。また、 $P_{Ar}$  が 0.5 Pa と 0.8 Pa の場合の比較では大きな差は見られない。このように、低  $P_{Ar}$  まで放電が安定に持続してかつ  $V_a$  も低いことから、プラズマフリーの条件で Co-Cr 膜の高速・低温形成が可能であると考えられる。そこで膜形成速度を調べた。図 6 に投入電力 ( $P_i$ ) と膜形成速度 ( $R_d$ ) の関係を示す。 $R_d$  は  $P_{Ar}$  に関係なく、 $P_i$  にほぼ比例しており、 $P_i$  が 600 W (投入電力密度  $7.6 \text{ W/cm}^2$ )、 $P_{Ar}$  が 0.2 Pa のときに  $10.5 \mu\text{m/hr}$  ( $0.18 \mu\text{m/min}$ ) とかなりハイレートな値が得られた。 $P_{Ar}$  が高くなるにつれて、 $R_d$  は低下するが、これは基板に到達する原子の平均自由行程が減少するた

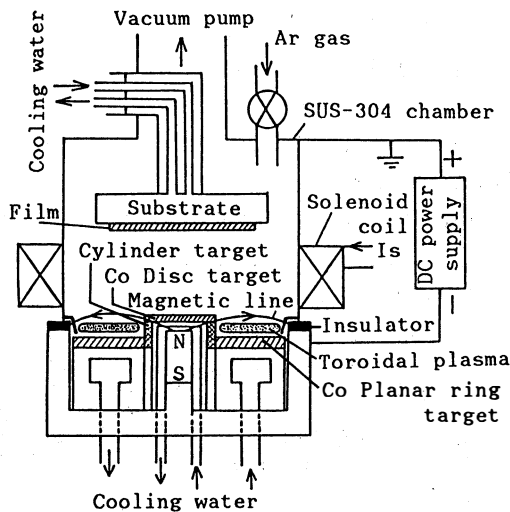


図 4 Co-Cr 膜形成用 TP マグネトロンスパッタ装置

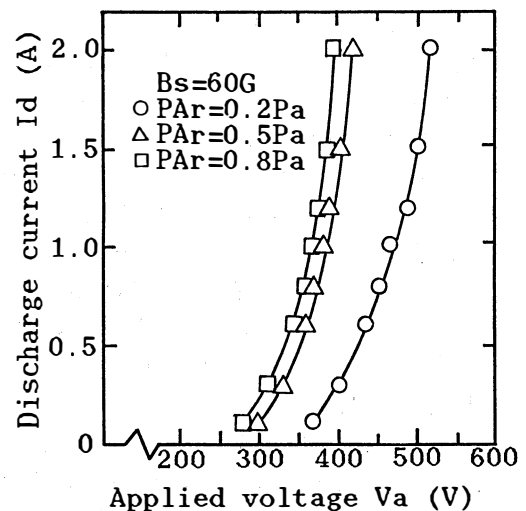


図 5 Co-Cr 膜形成時の装置の印加電圧—放電電流特性

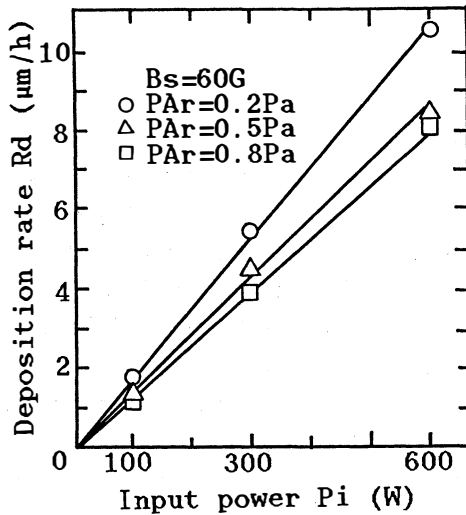


図6 Co-Cr 膜形成時の膜形成速度と投入電力の関係

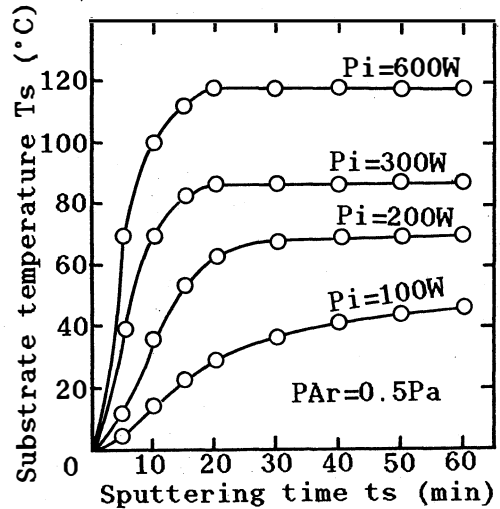


図7 Co-Cr 膜形成時の基板温度のスパッタ時間依存性

めと考えられる。今回、用いた電原の容量は最大2Aであったが、より大きな電源を用いれば、 $R_d$ はさらに速くなることが予想できる。

次に、図7に基板温度( $T_s$ )と $P_i$ の関係を示す。 $T_s$ はスパッタ開始後、約20分で飽和し、ほぼ一定値になる。この場合の測定点は突き出たディスクターゲット表面上である。Co-Cr 膜は通常 $0.5\mu\text{m}$ 以下の膜厚で十分であり、本装置を用いた場合のスパッタ時間は約3分以上と極めて短いため、基板の温度上昇も少なく、低温スパッタが可能である。この結果、熱的に弱いマイラ、PET などの上にも、ガラス基板同様に膜形成が行なえる。TP マグネトロンスパッタ装置を用いて Co-Cr 膜の形成を試みた結果、膜の高速・低温形成がある程度可能であることが示された。

$B_s$ を増加させると膜組成が変化することが明らかになっており、<sup>21)</sup>本実験でも図8のようにCo含有率や飽和磁化( $4\pi M_s$ )が減少する。形成膜はほぼ垂直c軸配向性を示し、c軸のロッギングカーブの半値幅( $\Delta\theta_{50}$ )は約 $8\sim 13^\circ$ である。<sup>22)</sup>形成膜の微細構造を調べた結果、断面柱状構造が観測された。一般に、膜の柱状構造は $P_{Ar}$ 、 $T_s$ にのみ依存し、結晶構造とは関係ないことが示されている。<sup>24)</sup>本研究でもc軸配向性と柱状構造の関連については明確な結論は得られていない。図9に形成膜の代表的なM-Hループを示す。図から、形成膜の磁気特性はほぼ膜面に垂直な磁気異方性を示し、磁化容易軸が膜面に垂直になることが分った。垂直方向の $4\pi M_s$ は約 $450\sim 800\text{emu/cc}$ 、保磁力( $H_c$ )は $180\sim 400\text{Oe}$ であった。本実験での $H_c$ は他の報告よりは小さいが、 $T_s$ をさらに高くすれば十分改善できる。

次に、二層膜構造のフロッピーディスクを作製して、電磁変換特性を調べた。ここでは、裏打ち層に面内方向に磁化容易軸を持つNi-Fe軟磁性膜<sup>25)</sup>を用い、補助磁極励磁形垂直ヘッドにより記録・再生実験を行った。主磁磁には膜厚 $1\mu\text{m}$ のCo-Zr-Nbアモルファス膜<sup>26)</sup>を用いた。再生波形は垂直磁気記録特有の孤立転移波形を示しており、垂直磁気記録が

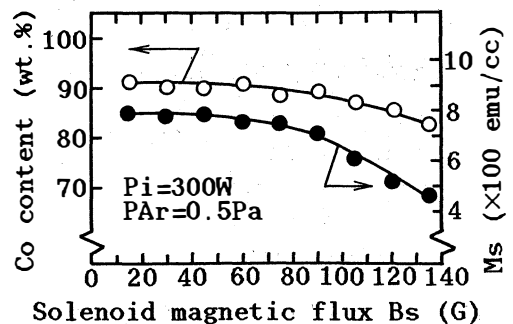


図8 ソレノイドコイル磁界とCo-Cr 膜中のCo含有率、飽和磁化の関係

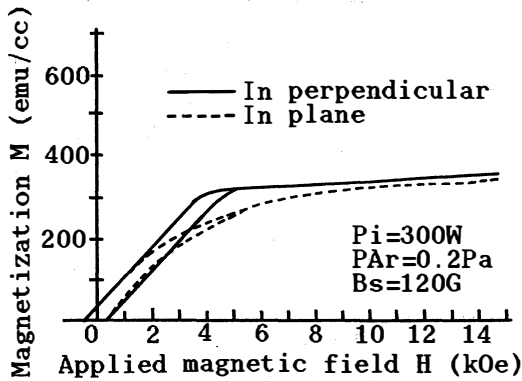
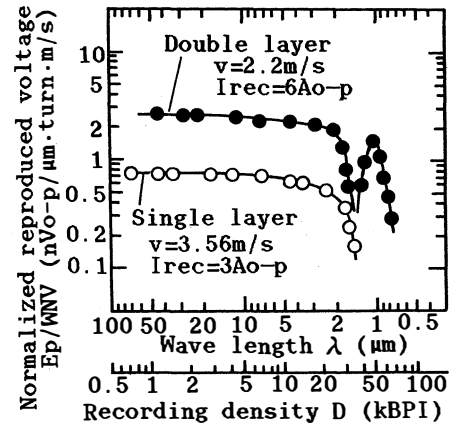
図9 代表的な Co-Cr 膜の  $M$ - $H$  ループ

図10 Co-Cr 記録媒体の記録波長と再生出力の関係

確認された。<sup>27)</sup>

図10に Co-Cr 単層膜と Co-Cr/Ni-Fe 二層膜媒体の記録波長と再生出力の関係を示す。再生出力はヘッドのトラック幅、巻線のターン数およびヘッド・媒体間の相対速度で規格化している。図から、二層膜媒体の方が規格化再生出力は単層膜媒体に比べ、3～4倍程度大きくなっており、裏打ち層の効果が現れている。また、第1零点以降にセカンドピークが現われ、線記録密度は最大再生出力の半分の値  $D_{50}$  で評価して約50kBPIである。第1出力零点および第2出力零点はそれぞれ約1.4 $\mu$ m および0.7 $\mu$ m であり、主磁磁の膜厚1 $\mu$ m に比べて大きくなっているが、この原因は垂直ヘッドと媒体間のスペーシングによる主磁極先端部の磁界がある程度広がりを持つためと考えている。

#### 4. Co-Zr アモルファス膜の形成

垂直ヘッド用の材料としては高飽和磁束密度、低保磁力、高透磁率などの、いわゆる軟磁気特性が要求される。<sup>29)</sup>特に、記録時に媒体を十分に磁化させるために高飽和磁束密度特性、再生時には再生感度の高い初透磁率の大きい特性が必要とされる。ここでは、最も基本的であり、垂直ヘッド用の材料として有望な Co-Zr アモルファス膜に着目した。<sup>30)</sup>図4の装置を用いてシリンドーターゲットを Cr から Zr に代えることにより、Co-Zr アモルファス膜を形成した。面積比は Co:Zr=9:1 である。実験装置の直流放電特性は定電圧特性を示し、 $P_{Ar}$  の低下に伴って  $V_a$  が高くなる。この装置の放電限界は0.15Pa と低ガス圧領域でのスパッタが可能であり、Co-Cr 膜の場合とほぼ同じ結果が得られた。<sup>31)</sup> $B_s$  を変化させて放電特性を調べた結果、 $V_a$  一定の場合  $B_s=60$ G 付近で  $I_d$  が最も多く流れたので以下の実験では、主に  $B_s=60$ G 一定として膜形成を行った。

$R_d$  は  $P_i$  にほぼ比例し、低  $P_{Ar}$  ほど高速となり、 $P_i=600$ W (投入電力密度7.6W/cm<sup>2</sup>)、 $P_{Ar}=0.2$ Pa、 $B_s=60$ G の時で約10 $\mu$ m/hr である。また、 $T_s$  は  $P_i$  にほぼ比例し、 $P_{Ar}$  に対してあまり変化しない。 $T_s$  は  $P_i=600$ W に対し、100℃以下であり低温での膜形成が可能である。

磁気特性として飽和磁化 ( $4\pi M_s$ )、抗磁力 ( $H_c$ ) および異方性磁界 ( $H_k$ ) を測定した。 $4\pi M_s$  は VSM、 $H_c$  および  $H_k$  は60Hz  $M$ - $H$  ループトレーサーを用いた。形成膜は膜面内に磁化容易軸と困難軸を持ち、その軸方向により  $H_c$ 、 $H_k$  の大きさと  $M$ - $H$  ループの傾きが異なっている。容易軸は  $M$ - $H$  ループの傾きが大きくなる ( $H_k$  が最小になる) 方向で、逆に困難軸は傾きが小さくなる ( $H_k$  が最大になる) 方向であ

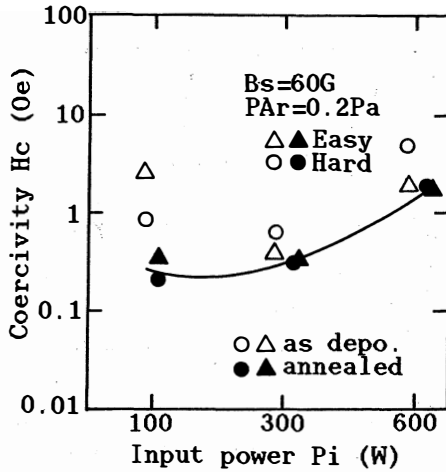


図11 Co-Zr アモルファス膜における困難軸方向の保磁力と投入磁力との関係

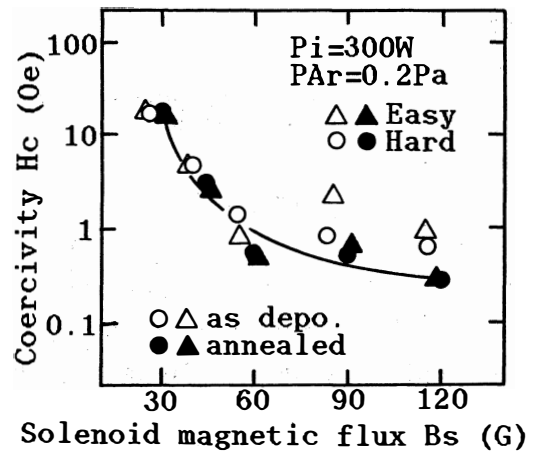


図12 ソレノイドコイル磁界による Co-Zr アモルファス膜の保磁力の変化

る。容易軸の方向は膜形成時の永久磁石による磁界の方向と一致しており、容易軸と困難軸の方向はちょうど90度の関係にある。測定試料の形状としては5×5mmの角形のものを用いた。

本スパッタ法により形成した薄膜は膜形成時に磁界の影響を受け、永久磁石による磁界の方向を容易軸に持つ異方性を有している。さらに、成膜されたままの膜は大きな磁歪を有していることがある。このため異方性と磁歪の低下のために磁場中でアニールを必要とする。本実験では試料のアニールを5×10<sup>-3</sup>Pa以下の真空中、200Gの直流回転磁界中で行った。アニールによる異方性の低下により困難軸方向で、高周波においても高い透磁率が得られ、雑音も少なくなる。

図11に困難軸における $H_c$ の $P_i$ に対する変化を示す。 $H_c$ は $P_i$ の増加に伴い、大きくなっているのがわかる。また低 $P_i$ ではアニールにより、 $H_c$ がかなり低下しているのがわかる。図12に困難軸における $H_c$ の $B_s$ に対する変化を示す。 $H_c$ は $B_s$ の増大につれて、約0.25Oeまで減少する。図13に $B_s$ による $4\pi M_s$ の変化を示す。 $4\pi M_s$ は $B_s$ の増加につれて16kG～12kGまで変化する<sup>32)</sup>。これらの原因の一つとしてCo-Cr膜の場合と同様に、 $B_s$ の増加によりプラズマが中心に収束し、中心部がよりスパッタされるために膜中のZr含有率が大きいためと考えられ、 $B_s$ により膜組成が制御できることを示唆している<sup>33)</sup>。

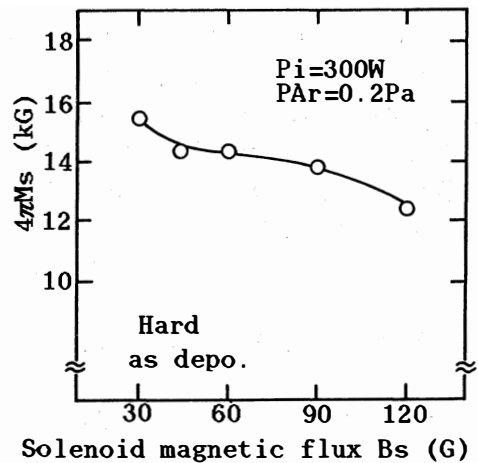


図13 ソレノイドコイル磁界による Co-Zr アモルファス膜の飽和磁化(困難軸方向)の変化

## 5. ま と め

本研究で開発したTPマグネトロンスパッタ法でCo-Cr膜を形成し、膜質の評価を磁気特性、結晶性の面から明らかにした。TPマグネトロンスパッタ法でも、ある程度のc軸配向性並びに垂直磁気

異方性を示す膜が $0.18\mu\text{m}/\text{min}$ 程度の高速で、かつ $100^\circ\text{C}$ 程度の低温で形成可能であることが分った。さらに、フロッピーディスクを製作して、 $D_{50}$ で50kBPIの記録・再生が実現できた。

また、Co-Zrアモルファス膜を形成し、膜質の評価を磁気特性から明らかにした。膜形成速度は投入電力に比例し、低Arガス圧ほど高速で、最大 $0.16\mu\text{m}/\text{min}$ 、その時の基板温度は約 $100^\circ\text{C}$ であり、Co-Zr膜の高速・低温形成が可能となった。 $4\pi M_s$ 、 $H_c$ などの値から、形成膜はある程度の軟磁気特性を示した。アニール温度を $350^\circ\text{C}$ よりも高くすると、 $H_k$ は減少するものの、 $H_c$ は増大し、結晶化がある程度進行することがX線回折の結果より明らかにされた。

よりプラズマを制御した状態で膜形成を行えば、Co-Cr膜、Co-Zrアモルファス膜の膜質が著しく改善でき、本方式が垂直磁気記録用薄膜の形成に十分有効な方法であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 例えば、G.K.Weher: Phys.Rev., **102**, 690(1956), G.K.Weher: Phys.Rev., **108**, 35(1957), P.Sigmund: Phys.Rev., **184**, 383(1969), G.Canter & J.S.Colligon: "Ion bombardment of Solids" (Heinemau, 1968), L.I.Maissel & R.Glang: "Handbook of Thin Film Technology" (McGraw-Hill Book Company, New York, 1970), B.Chapman: "Glow Discharge processes" (John Wiley & Sons, New York, 1980), R.Behrish: "Sputtering by Particle Bombardment I" (Springer Verlag, 1981), R.Behrish: "Sputtering by Particle Bombardment II" (Springer verlag, 1983), R.Stuart: "Vacuum Technology, Thin Films & Sputtering" (Academic Press, New York, 1983), J.L.Vossen & W.Kern: "Thin Film Processes" (Academic Press, New York, 1978), 麻蒔立男: "薄膜作成の基礎" (日刊工業新聞社, 1977), 早川 茂, 和佐清孝: "薄膜化技術" (共立出版, 1982), 金原 榮: "スパッタリング現象" (東大出版会, 1984) など。
- 2) 高橋, 吉田: 真 空, **26**, 571(1983).
- 3) 例えば, S.S.Lau, R.H.Hills & D.G.Math: J.Vac.Sci. & Technol., **9**, 1196(1972), 細川, 中司: 真 空, **16**, 327(1973), S.Aoshima & T.Asamaki: Jpn.J. Appl. Phys., **Suppl.2, Pt.1**, 254(1974), T.Tsukada, N.Hosokawa & H.Kobayashi: Jpn.J. Appl. Phys., **17**, 787(1978), R.Hierougmi, B.Sirovich & W.Class: Thin Solid Films, **96**, 241(1982) など。
- 4) J.S.Chapin: Res.Dev., **25**, 37(1974).
- 5) 中川, 新村, 直江, 星: 電子通信学会技術報告, CPM85-114 (1986).
- 6) S.Shiller: Vakuum Technik, **27**, 51(1977).
- 7) 南: ULVAC TECHNICAL JOURNAL, **23**, 15(1985).
- 8) 例えば, 高橋, 吉田, 武田: 電子通信学会論文誌(c), **J66-C**, 820(1983), 高橋, 吉田: 金属表面技術, 新材料ドライプロセッシング専門部会第4回例会資料, 1(1987) など。
- 9) 高橋, 吉田: 電子通信学会論文誌(c), **J67-C**, 180(1984).
- 10) 例えば, 星, 直江, 山中: 電子通信学会論文誌(c), **J60-C**, 645(1977), 星, 直江, 山中: 電子通信学会論文誌(c), **J65-C**, 490(1982), M.Naoe, Y.Hoshi, S.Yamanaka & M.Kume: Jpn.J. Appl. Phys., **22**, 1519(1983), 松岡, 星, 直江: 電子通信学会論文誌(c), **J68-C**, 548(1984), M.Naoe, M.Matsuoka & Y.Hoshi: J.Appl.Phys., **57**, 4019(1985), T.Hirata, S.Kaku & M.Naoe: Symposia Proceeding of Maferials Research Society, **58**, 305(1986) など。
- 11) T.Hata, T.Minamikawa, E.Noda, O.Morimoto and T.Hada: Jpn.J. Appl. Phys., **18**, **Suppl. 18-1**, 219(1979), 高橋: 電子通信学会論文誌(c), **J68-C**, 620(1985), 高橋, 吉田: 真 空, **26**, 837(1983) など。
- 12) 高橋 隆一: 博士学位論文, 172(東京工業大学, 昭和63年3月)。
- 13) 高橋, 宮田, 吉田: 電子通信学会論文誌(c), **J67-C**, 559(1984).

- 14) 高橋, 宮田, 吉田: 真空, **27**, 829(1984).
- 15) 高橋, 宮田, 吉田: 電子通信学会論文誌(c), **J67-C**, 631(1984).
- 16) 例えば, S.Iwasaki & Y.Nakamura: IEEE Trans.Magn., **MAG-13**, 1272(1977), 岩崎: 応用物理, **33**, 614(1984), 岩崎: 日本音響学会誌, **36**(1980), 岩崎: テレビジョン学会誌, **37**, 618(1983), 東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集「垂直磁気記録」(1982)など.
- 17) 例えば, 畑, 大坪, 高橋, 波田: 電子通信学会論文誌(c), **J69-C**, 131(1986), 畑, 高橋, 大坪, 喜多, 波田: 電子通信学会論文誌(c), **J69-C**, 120(1986), 松岡, 星, 直江, 山中: 電子通信学会論文誌(c), **J67-C**, 254(1984), Y.Niimura & M.Naoe: IEEE Trans.Magn., **MAG-21**, 1447(1985), Y.Niimura, S.Nakagawa & M.Naoe: IEEE Trans. Magn., **MAG-22**, 1164 (1986), Y.Niimura, S.Nakagawa & M.Naoe: IEEE Trans. Magn., **MAG-23**, 2043(1987), G.L.McIntire & C.F.Brucker: IEEE Trans. Magn., **MAG-24**, 2221(1988)など.
- 18) 例えば, 松岡, 星, 直江, 山中: 電子通信学会論文誌(c), **J67-C**, 17(1984), 松岡, 星, 直江, 山中: 電子通信学会論文誌(c), **J66-C**, 9(1983), 森迫, 松本, 直江: 電子通信学会論文誌(c), **J69-C**, 902(1986), M.Matsuoka, Y.Hoshi, M.Naoe & S.Yamanaka: IEEE Trans. Magn., **MAG-18**, 1119(1982), M.Naoe, S.Hasunuma, Y.Hoshi & S.Yamanaka: IEEE Trans. Magn., **MAG-17** (1982)など.
- 19) 大内, 岩崎: 東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集「垂直磁気記録」, 131(1982).
- 20) T.Takahashi, T.Miyata, J.Yoshida & T.Hata: Jpn.J. Appl. Phys., **24**, L752(1985).
- 21) 高橋, 金井, 高本, 吉田: 日本応用磁気学会誌・論文特集号, **12**, 69(1988).
- 22) 高橋, 宮田, 吉田: 日本応用磁気学会誌・論文特集号, **10**, 51(1986).
- 23) J.A.Thornton: J.Vac. Sci. & Technol., **11**, 666(1974), 直江, 新村: 応用磁気セミナー, 27(1985)など.
- 24) 新村, 直江: 電子通信学会技術報告, MR85-9(1985).
- 25) 例えば, T.Takahashi, J.Yoshida & M.Naoe: The International Perpendicular Magnetism Recording Conference (Tokyo, 29-31st Aug. 1989)に2件の論文発表予定.
- 26) 例えば, T.Takahashi, M.Yoneda & M.Naoe: Jpn.J. Appl. Phys. に掲載予定(1989年3月), 小山, 辻本, 白江: 日本応用磁気学会誌・論文特集号, **10**, 327(1986), M.Miura, H.Katahashi, K.Muramori & M.Kajiyama: IEEE Trans.Magn., **MAG-24**, 2215(1988)など.
- 27) 福田, 辻村, 高橋, 吉田, 宮田: 昭和61年電気関係学会北陸支部連合大会論文集, D-15(1986). T.Takahashi & M.Naoe: International Magnetism Conference '89, Abstracts, KA-06 (Washington, DC, 28-31st Mar. 1989).
- 28) S.Iwasaki, Y.Nakamura & K.Ouchi: IEEE Trans. Magn., **MAG-15**, 1456(1979).
- 29) 例えば, 小林, 戸田, 山本, 高木, 高橋, 畑: 日本応用磁気学会誌, **10**, 23(1986), 中村, 岩崎: 東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集「垂直磁気記録」, 35(1982)など.
- 30) 例えば, 島田, 小島: 東北大学電気通信研究所シンポジウム論文集「垂直磁気記録」, 111(1982), M.Naoe, M.Terada, Y.Hoshi & S.Yamanaka: IEEE Trans. Magn., **MAG-20**, 1311(1983), 島田, 小島: 電子通信学会技術報告, CPM81-11(1981), Y.Simada & H.Kojima: J.Appl. Phys., **47**, 4156(1976), 田子, 西村: 電子通信学会技術報告, MR83-27(1983)など.
- 31) 高橋, 米田, 直江: 昭和63年電気関係学会北陸支部連合大会論文集, D-19(1988).
- 32) T.Takahashi, M.Yoneda & M.Naoe: Fifth International Conference on Ferrites, Abstracts, B8-05 (Bombay, 13th Jan. 1989), T. Takahashi, M. Yoneda and M. Naoe: Proceedings of Fifth International Conference on Ferrites に掲載予定(1989年5月)など.
- 33) T. Takahashi & M. Naoe: International Magnetism Conference '89, Abstracts, AQ-10 (Washington, DC, 28-31st Mar. 1989).



## Development of Toroidal Plasma (TP) Magnetron Sputtering Method

Takakazu Takahashi\*, Masaaki Yoneda\*\*, and Masahiko Naoe\*\*\*

A new sputtering technique termed the toroidal plasma (TP) magnetron sputtering method is proposed in order to suppress the bombardments of  $\gamma$ -electrons and high energy particles to the substrate during film deposition. A novel point of this apparatus is the form of the toroidal plasma on a magnetic planar ring target. Co-Cr films and Co-Zr ones were prepared by TP magnetron sputtering method. From the erosion profile of the target, the toroidal plasma was confined on Co planar ring target by the magnetic flux. The deposited Co-Cr films showed c-axis orientation and magnetic anisotropy perpendicular to the film plane. On the other hand, the deposited Co-Zr films showed amorphous state and soft magnetic properties.

[英文和訳]

## 封じ込め磁界を利用したトロイダルプラズマ式 マグネトロンスパッタ法の開発

高橋 隆一\*, 米田 政明\*\*, 直江 正彦\*\*\*

$\gamma$  電子や高エネルギー粒子などによる膜形成時の基板衝撃を抑制するためにトロイダルプラズマ式 (TP) マグネトロンスパッタ法と呼ばれる新しい技術を提案する。この方式の特徴は強磁性体プレーナリングターゲット上にトロイダルプラズマを形成することである。装置を用いて、Co-Cr 膜および Co-Zr 膜を形成した。ターゲットのエロージョンパターンから、Co プレーナリングターゲット上にトロイダルプラズマが封じ込められた。形成された Co-Cr 膜は基板面に対し、垂直 c 軸配向性と垂直磁気異方性を示した。一方、形成された Co-Zr 膜はアモルファス状態で軟磁気特性を示した。

(1988年10月31日受理)